



TITLE:

鉄系高温超伝導の物理(研究会報告)

AUTHOR(S):

---

CITATION:

鉄系高温超伝導の物理(研究会報告). 物性研究 2011, 96(5): 525-530

ISSUE DATE:

2011-08-05

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/169609>

RIGHT:

## 研究会報告

研究会番号：YITP-W-11-02

### 「鉄系高温超伝導の物理」

開催日時：2011 年 6 月 16 日～2011 年 6 月 17 日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所 パナソニック国際交流ホール

参加者数：81 名

#### [研究会の目的・趣旨]

2008 年に日本で発見された鉄系高温超伝導体は、55 K に達する高い超伝導転移温度を有することから世界の注目を集めた。この超伝導現象の発現機構の解明を目指した研究が盛んに行われ、世界中の物性研究者がしのぎを削っている。

超伝導状態では多軌道・多バンドに起因して複数のフェルミ面が超伝導ペアに寄与している。理論から提案されているペアリング機構としてはスピン揺らぎによるものと軌道揺らぎによるものがある。前者はギャップ関数にフェルミ面ごと異なった位相を生じるが、後者は同位相のギャップ関数となる。どちらが実現しているか、現在盛んに理論および実験的研究が推進されている。

多くの鉄系超伝導物質では、超伝導相が構造相転移を伴う反強磁性相が隣接している。この反強磁性相では一つの方向にスピンが反強磁性的、もう一方向には強磁性的に並ぶストライプ的な磁気構造を持つ。最近、反強磁性転移温度より高温から 4 回対称性を破るネマティック状態が観測されたり、転移温度以下の反強磁性秩序相でディラック型の線形分散が発見されたりと興味深い実験事実が次々と明らかになっている。これらが超伝導発現機構とどのような関係にあるか明らかにすることが理論の課題の一つとなっている。さらに、超伝導と反強磁性の共存相の存在や、量子臨界点に伴う非フェルミ液体的伝導特性も報告されており、超伝導機構だけでなくその舞台となる電子状態も多秩序量子相という観点から注目を集めている。

このような状況を踏まえ、日本国内で鉄系高温超伝導の理論研究で成果を挙げている第一線の研究者を集め、最近の成果について討論するとともに、実験研究者の講演も織り交ぜて今後の鉄系高温超伝導研究の方向性について議論を行った。具体的には、第一原理計算による電子状態研究、反強磁性金属相の磁氣的・電子的性質、ネマティック状態の起源、反強磁性・超伝導共存相の物性と起源、超伝導ペアリング対称性、スピン揺らぎと軌道揺らぎの協同・競合、電子・格子相互作用の効果、三次元性の効果、量子臨界点・非フェルミ液体的振る舞いの研究など幅広い問題を取り上げた。

[研究会の内容]

研究会では、81名の参加者を得て、25分講演16件、20分講12件、10分講演1件、ポスター講演20件の計49件の講演が二日間にわたって行われた。初日の午前中には、鉄系超伝導体のスピン・軌道秩序状態や量子臨界性に関する最新の実験結果が紹介された。まず  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  (Ba122) の弾性定数が広範なドーピング領域で顕著なソフトニングを示すことが報告され、軌道揺らぎの存在が示された。次いで  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  系で核磁気緩和率やサイクロトロン質量、磁場侵入長などが量子臨界点に向けて発散的に増大することが報告された。さらに磁場中トルク測定から、構造相転移温度以上から電子状態の異方性が生じることが示された。また秩序状態における光学伝導度の測定から、有限エネルギー領域の電子状態が顕著な異方性を持つことが示された。次いで多軌道模型に基づく理論解析が紹介され、電子状態の異方性の起源が議論された。

引き続き、鉄系超伝導体の最近の理論研究が発表された。まず中性子散乱や共鳴 X 線散乱における異方性から、スピン・軌道秩序を検証する理論が提唱された。次いで超伝導発現機構が議論された。現在スピン揺らぎを起源とする符号反転がある「 $S_{\pm}$ 波状態」と、軌道揺らぎを起源とする符号反転がない「 $S_{++}$ 波状態」が有力視されている。鉄系超伝導体では  $T_c$  と結晶構造の相関が強く、 $\text{As}_4$  が正四面体であるとき  $T_c$  が最大になることが知られている (Lee-plot)。Lee-plot に対するスピン揺らぎ理論に基づく説明と、軌道揺らぎ理論に基づく説明がなされた。また軌道揺らぎ理論により構造相転移や弾性定数のソフトニングが説明されたが、スピン揺らぎによる説明の試みも紹介された。

その後、超伝導対称性を判定する上で重要な実験手法である、非弾性中性子散乱や不純物効果、プロトン照射、NMR の実験結果が報告され、 $S_{\pm}$ 波状態か  $S_{++}$ 波状態か、活発な議論がなされた。また最近の話題である、鉄セレン系超伝導体に関する最新の実験の報告があった。

二日目の午前中には、まず第一原理計算に基づく電子状態の解析が報告された。LDA+DMTF に基づくフェルミ面の軌道依存性、鉄系超伝導体の有効モデルの導出方法、導出された有効モデルに基づく多変数変分計算の結果が紹介された。また最新の LDA+U 法に基づき、鉄系超伝導体の秩序状態における「小さな磁気モーメント」の説明が試みられた。

午後に入り、まず Ba122 系における輸送現象の異方性の詳細な測定が報告され、電子系のネマティック秩序の存在が議論された。その後、角度分解光電子分光 (ARPES) の実験報告が続いた。ホールドーピング系、電子ドーピング系、非ドーピング系など様々な鉄系超伝導体における超伝導ギャップ構造が明らかにされ、超伝導対称性が盛んに議論された。また角度回転磁場中の熱伝導度の測定から Ba122(As,P)系のギャップノード構造が決定されたという報告があった。さらに STM/STS による不純物効果が測定され、電子状態の対称性の低下や、超伝導状態におけるインギャップ状態等の観測が報告された。平

均場近似によるその理論的解析が報告され、超伝導対称性が活発に議論された。

最後に、超伝導状態における非弾性中性子散乱の実験と理論が紹介された。実験で観測されるピーク構造が、 $S$ ±波状態で期待される「レゾナンス機構」によるものか、 $S++$ 波状態で期待される「非散逸機構」によるものか、長時間の議論がなされた。

研究会では質疑応答が長引き休憩時間まで議論が続くなど、非常に活発な意見交換がなされ、大変有意義な研究会となった。今後、この研究会を土台としてこの分野で研究を進めている研究者を中心とした新しい国際的コミュニティーが形成されることが望まれる。

研究会プログラムおよび講演のアブストラクトを次ページ以下に掲載する。

[世話人]

紺谷 浩（名古屋大学大学院理学研究科）（代表）

遠山 貴己（京都大学基礎物理学研究所）

松田 祐司（京都大学大学院理学研究科）

池田 浩章（京都大学大学院理学研究科）

黒木 和彦（東京電子通信大学大学院理学研究科）

有田 亮太郎（東京大学大学院工学研究科）

京都大学基礎物理学研究所研究会

「鉄系高温超伝導の物理」

2011年6月16日(木)~17日(金) 湯川記念館パナソニック国際交流ホール

6月16日(木)

9:00-9:05 はじめに、アナウンス

座長: 紺谷 浩

9:05-9:30 吉澤 正人 (岩手大工)  
「弾性定数に現れる $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  の量子臨界的性質」

9:30-9:55 芝内 孝禎 (京大理)  
「 $\text{BaFe}_2(\text{As,P})_2$  における量子臨界現象」

9:55-10:15 中島 正道 (東大理)  
「 $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  の異方的光学スペクトル」

10:15-10:25 杉本 高大 (京大基研)  
「鉄系超伝導体反強磁性相における光学遷移の異方性」

(休憩)

座長: 有田 亮太郎

10:50-11:10 遠山 貴己 (京大基研)  
「鉄砒素系反強磁性金属相のスピン・電荷励起 — 非弾性中性子散乱と共鳴非弾性X線散乱 —」

11:10-11:30 黒木 和彦 (電通大)  
「鉄系超伝導体における結晶構造と臨界温度の相関の起源」

11:30-11:50 池田 浩章 (京大理)  
「相関効果とギャップ関数の物質依存性」

11:50-12:15 大野 義章 (新潟大理)  
「鉄系超伝導体における軌道の秩序と揺らぎ」

(昼食)

座長: 遠山 貴己

13:45-14:05 紺谷 浩 (名大理)  
「光学フォノンによる反強のおよび強軌道揺らぎの発生: 超伝導・構造相転移・ソフトニング」

14:05-14:30 佐藤 正俊 (総合科学研究機構)  
「磁気励起スペクトルと超伝導対称性」

14:30-14:50 仲島 康行 (東大工)  
「鉄ニクタイト超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  におけるプロトン照射による超伝導転移温度の抑制」

14:50-15:15 高野 義彦 (物材機構)  
「鉄系超伝導体FeSe系の合成と物性」

(休憩)

座長: 松田 祐司

15:40-16:05 中井 祐介 (京大理)  
「NMRからみた鉄系超伝導における磁性と超伝導」

16:05-16:25 小林 義明 (名大理)  
「鉄系超伝導体 $\text{LaFeAsO}_{0.89-x}\text{F}_{0.11-x}$  及び $\text{Ca-Fe-Pt-As}$  のNMR」

16:25-16:45 鄭 国慶 (岡山大理)  
「鉄砒素系超伝導体のNMR研究: スピン-重項・多重等方ギャップ」

16:45-18:30 ポスター 湯川記念館2, 3階

18:30 懇親会 北部生協2階「喫茶ほくと」

6月17日(金)

座長: 福山 秀敏

- 9:00-9:20 有田 亮太郎 (東大工)  
「鉄系超伝導体のフェルミ面の軌道依存性 - LDA+DMFTによる解析 -」
- 9:20-9:45 中村 和磨 (東大工)  
「第一原理計算に基づく有効模型導出と高精度模型解析  
- 鉄系超伝導体の磁性に対する強相関アプローチからの考察 -」
- 9:45-10:10 町田 昌彦 (原子力機構)  
「鉄系超伝導母物質における磁気及び電荷四重極モーメントと軌道秩序  
- 第一原理計算LDA+U法によるアプローチ -」
- 10:10-10:30 三澤 貴宏 (東大工)  
「鉄系超伝導体の第一原理有効模型の解析 - 磁気秩序モーメントの物質依存性の解明 -」

(休憩)

座長: 芝内 孝禎

- 10:55-11:20 永崎 洋 (産総研)  
「 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ の異方的輸送現象」
- 11:20-11:45 辛 埴 (東大物性研)  
「 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  と  $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.65}\text{P}_{0.35})_2$  のレーザー光電子分光」
- 11:45-12:10 吉田 鉄平 (東大理)  
「 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ における3次元フェルミ面形状の組成変化」

(昼食)

座長: 黒木 和彦

- 13:40-14:05 佐藤 宇史 (東大理)  
「ARPESでみた鉄系超伝導体の超伝導ギャップと擬ギャップ」
- 14:05-14:25 岡崎 浩三 (東大物性研)  
「 $\text{Fe}(\text{Te}, \text{Se})$  のレーザー角度分解光電子分光」
- 14:25-14:45 松田 祐司 (京大理)  
「鉄ヒ素系超伝導体のギャップノード構造」
- 14:45-15:10 花栗 哲郎 (理研)  
「STM/STSで見た鉄系超伝導体の超伝導ギャップ」

(休憩)

座長: 池田 浩章

- 15:35-16:00 苅宿 俊風 (東大理)  
「鉄系超伝導体の秩序変数と不純物束縛状態の理論」
- 16:00-16:25 社本 真一 (原子力機構)  
「中性子散乱から見た鉄系超伝導体」
- 16:25-16:45 永井 佑紀 (原子力機構)  
「中性子散乱実験を用いた鉄系超伝導体のペアリング状態の判別方法」
- 16:45-17:10 大成 誠一郎 (名大工)  
「鉄系超伝導体における中性子散乱スペクトル及び軌道レゾナンス」
- 17:10-17:25 まとめ、アナウンス

## ポスター発表

- P1 柳 有起 (新潟大自然)  
「鉄系超伝導体のd-p 模型における軌道-格子結合効果」
- P2 北川 俊作 (京大理)  
「NMR・NQRから見た鉄系超伝導体 $\text{LaFeAsO}_{0.85}$ におけるZn不純物効果」
- P3 横谷 尚睦 (岡山大院自然)  
「正逆光電子分光による $\text{Fe}(\text{Se}, \text{Te})$ の電子状態研究」
- P4 出田 真一郎 (東大理)  
「角度分解光電子分光による $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$  (TM = Ni, Cu) の電子構造研究」
- P5 村野 悠一郎 (千葉大理)  
「 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  のNMR研究」
- P6 家 哲也 (京大理)  
「 $^{31}\text{P}$ -NMRによる $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$  の反強磁性と超伝導の研究」
- P7 小牧 泰大 (千葉大理)  
「単結晶 $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$  における圧力下電気抵抗測定」
- P8 渡部 洋 (理研)  
「変分モンテカルロ法による鉄系超伝導体の対称性の解析」
- P9 大田 由一 (東大物性研)  
「 $\text{KFe}_2\text{As}_2$  のレーザー角度分解光電子分光」
- P10 浮田 龍一 (広大総合科学)  
「 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  ( $x=1.0, 0.7, 0.5$ ) の低温STM 観測」
- P11 齋藤 哲郎 (名大理)  
「鉄系超伝導体におけるギャップ関数の軌道依存性の研究  
10 軌道Hubbard-Holstein モデルによる解析」
- P12 石田 茂之 (東大理)  
「 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  の輸送特性とアニール効果」
- P13 三本 啓輔 (新潟大自然)  
「超音波計測による $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$  の四極子揺らぎの研究」
- P14 石角 元志 (原子力機構)  
「鉄系超伝導体 $\text{La1111}$ 系及び $\text{BaFe}_2(\text{As}, \text{P})_2$  の磁気散乱」
- P15 井深 壮史 (東大物性研)  
「 $\text{Ba}(\text{Fe}, \text{Co})_2\text{As}_2$  における磁気ゆらぎ面内異方性の中性子散乱による研究」
- P16 坪田 幸士 (岡山大自然)  
「 $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{As}_2$  の軟X 線光電子分光」
- P17 杉本 高大 (京大基研)  
「鉄系超伝導体反強磁性相における光学遷移の異方性」
- P18 出口 啓太 (筑波大数理物質)  
「 $\text{Fe}(\text{Te}, \text{S})$ における超伝導特性向上物質の探索」
- P19 井上 善夫 (名大理)  
「鉄系超伝導体における不純物誘起の軌道秩序の理論 - 局所対称性の逐次低下 -」
- P20 山川 洋一 (名大理)  
「鉄系超伝導体における不純物散乱とトンネル伝導度の理論研究」